

世界地磁模型在飞行管理系统中的应用

田佩*, 朱斌

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 飞行管理系统采用真北基准作为方位角的参考基准, 针对飞行员可选择方位角的输入或输出基准为磁北基准的问题, 采用引入世界地磁模型计算空间某地理点的磁差的方法, 将方位角在真北和磁北基准之间进行转换, 并分析了飞行高度对磁差计算精度的影响。结果表明: 采用世界地磁模型计算的磁差精度满足 MIL-W-89500 规范要求, 世界地磁模型可以应用于飞行管理系统中。

关键词: 世界地磁模型; 飞行管理系统; 磁差

中图分类号: P 318 文献标志码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 06-0071-04

飞行管理系统 (Flight Management System, FMS) 是现代大型飞机数字化电子系统的核心: 在综合导航、性能优化、燃油管理与监视等方面辅助飞机机组人员; 管理飞机的水平飞行轨迹和垂直飞行轨迹; 在驾驶舱显示飞机空速、高度以及推力指示等信息, 以帮助飞行员实现有效飞行。

飞行员可控制主飞行画面、导航画面以及飞行管理系统的航向、航迹、风向或方位显示和输入的参考基准。参考基准包括真北和磁北基准: 真北基准是以真北方向作为参考基准, 而磁北基准是以磁北方向作为参考基准。目前飞行管理系统内部涉及方位的所有计算均采用真北基准。当方位的输入或输出基准为磁北基准时, 必须进行角度的真磁基准转换, 且转换的精度必须符合相关规范要求,

真北与磁北之间的夹角为磁差。磁差是描述地磁场的一个参量, 因而, 磁差随地理位置、高度、时间而变化。目前, 由美国国家地球物理资料中心和英国地质调查所发布的世界地磁模型 (World Magnetic Model, WMM) 可以计算得到全球任意点位置的地磁场特征量, 并被广泛应用在地磁导航领域。

本文引入世界地磁模型进行空间某地理位置的磁差计算, 进而支持飞行管理系统方位角的真 / 磁基准转换需求。

1 真方位角与磁方位角的转换

真方位角与磁方位角的转换关系 (见图 1) 为:

$$\varphi_{\text{mag}} = \varphi_{\text{true}} - D$$

式中: φ_{mag} 为方位角, φ_{true} 为真方位角, D 为磁差。

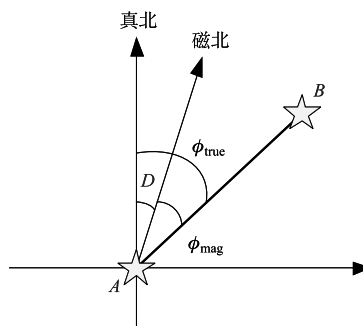


图 1 真方位角与磁方位角关系

Fig.1 Relationship between true heading and magnetic azimuth

由图 1 可知, 进行方位角的真 / 磁基准转换必须获取相应参考点 (如航路点 A) 的磁差。在飞行管理导航数据库中存储的航路点、导航台、跑道或机场, 其磁差数据是已知的。而对于飞行员临时创建的航路点, 其磁差信息未知。此时, 就需要计算该航路点的磁差。

2 地球磁场

地球磁场由主磁场、异常场及干扰场组成, 是不规则和长期变化的, 因此磁偏角在世界各地也呈不规则分布^[1,2]。通过对地磁场的长期观测表明, 主磁场是随时间缓慢变化的, 也将其称为地磁场的长期变化。对主磁场的长期变化可

收稿日期: 2015-08-19 退修日期: 2016-02-26 录用日期: 2016-04-11

* 通讯作者: Tel: 029-86832928 E-mail: wenyutp@hotmail.com

引用格式: TIAN Pei, ZHU Bin. Application of world magnetic model in flight management system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(06): 71-74. 田佩, 朱斌. 世界地磁模型在飞行管理系统中的应用 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(06): 71-74.

以建立相应的模型。异常场及干扰场变化不规则且对地球磁场影响较小,因而在地球磁场建模中只考虑主磁场,对异常场和干扰场不予考虑。

通常,以7个分量来描述地磁场向量(见图2):北向强度分量 X ;东向强度分量 Y ;垂直强度分量 Z (向下为正);水平强度分量 H ;总磁强度分量 F ;磁倾角 I (顺时针为正);磁差/磁偏角 D (顺时针为正)。在这7个分量中,北向强度分量,东向强度分量和垂直强度分量为基础分量,其他分量可由其计算得到:

$$\begin{cases} H = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ F = \sqrt{H^2 + Z^2} \\ I = \arctan \frac{Z}{H} \\ D = \arctan \frac{Y}{X} \end{cases}$$

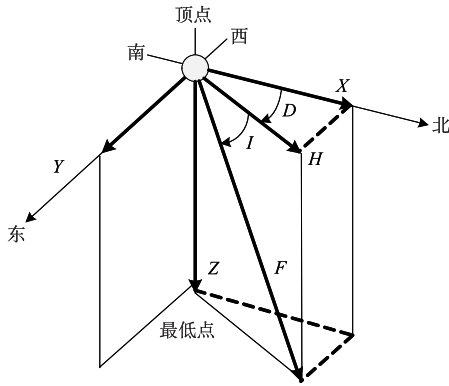


图2 地磁场向量
Fig.2 Magnetic vectors

3 世界地磁模型

世界地磁模型可以计算得到全球任意点位置的地磁场特征量。主磁场的长期变化以线性表示,将磁势的12阶球谐表达式中与时间相关的各系数描述为线性表示^[2]。由于主磁场的长期变化中含有不可预测的非线性变化,所以WMM模型的系数每5年做一次更新。

3.1 建模方法

对于给定的时间和空间参数 (λ, φ, h, t) ,可以通过建立主磁场长期变化模型计算出主磁场各分量的长期变化率。其中, λ 和 φ 表示大地经纬度; h 为平均海平面高度; t 为十进制时间。

其计算方法如下^[3]:

(1) 高度转换:利用地球重力场模型EGM96将平均海平面高度转换成WGS84椭球坐标系的高度 h 。

(2) 坐标系转换:将大地坐标系 (λ, φ, h) 转换为球面地心坐标系 (λ, φ', r) ,其中 λ 保持不变,由 (φ, h) 计算 (φ', r) 。

$$\begin{cases} \varphi' = \arcsin \frac{z}{r} \\ r = \sqrt{p^2 + z^2} \\ z = (Rc(1-e^2) + h) \sin \varphi \\ p = (Rc + h) \cos \varphi \end{cases}$$

式中: Rc 为曲率半径, $Rc = A/\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}$; A 为椭球长半轴, $A=6378137\text{m}$; e 为偏心率, $e^2=f(2-f)$; f 为地球扁率, $1/f=298.257223563\text{m}$ 。

(3) 计算给定日期 t 相关的高斯系数:

$$\begin{cases} g_n^m(t) = g_n^m(t_0) + (t - t_0) \dot{g}_n^m(t_0) \\ h_n^m(t) = h_n^m(t_0) + (t - t_0) \dot{h}_n^m(t_0) \end{cases}$$

式中: $t_0=2015.0$ 是模型的基准日期; $g_n^m(t_0), h_n^m(t_0)$ 为主场系数; $\dot{g}_n^m(t_0), \dot{h}_n^m(t_0)$ 为长期变化系数,通过查WMM2015模型可得。

(4) 计算当前位置的主磁场分量 X', Y' 及 Z' :

$$\begin{aligned} X'(\lambda, \varphi', r) &= - \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) \frac{d\tilde{P}_n^m(\sin \varphi')}{d\varphi'} \\ Y'(\lambda, \varphi', r) &= \frac{1}{\cos \varphi'} \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (g_n^m(t) \sin m\lambda - h_n^m(t) \cos m\lambda) \tilde{P}_n^m(\sin \varphi') \\ Z'(\lambda, \varphi', r) &= - \sum_{n=1}^{12} (n+1) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) \tilde{P}_n^m(\sin \varphi') \end{aligned}$$

$$\tilde{P}_n^m(\mu) = \begin{cases} 2 \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_{n,m}(\mu), & m > 0 \\ P_{n,m}(\mu), & m = 0 \end{cases}$$

$$\frac{d\tilde{P}_n^m(\sin \varphi')}{d\varphi'} = (n+1) \tan \varphi' \tilde{P}_n^m(\sin \varphi') - \sqrt{(n+1)^2 - m^2} \sec \varphi' \tilde{P}_{n+1}^m(\sin \varphi')$$

式中: a 为地球平均半径, $a=6371200\text{m}$; $P_{n,m}(\mu)$ 为Schmidt缔合勒让德函数。

(5) 将地心坐标系下的主磁场分量 X', Y' 及 Z' 旋转至大地坐标系:

$$\begin{aligned} X &= X' \cos(\varphi' - \varphi) - Z' \sin(\varphi' - \varphi) \\ Y &= Y' \\ Z &= X' \sin(\varphi' - \varphi) + Z' \cos(\varphi' - \varphi) \end{aligned}$$

(6) 计算磁差 D :

$$D = \arctan \frac{Y}{X}$$

3.2 误差评估

目前,最新的地磁模型WMM2015适用时间段为2015.0~2020.0,其磁差计算的均方根误差(Root Mean Square, RMS)为 0.47° ,其精度优于军用规范MIL-W-89500的要求(磁差的精度要求为 1°)^[3]。

4 飞行管理系统的方位角真/磁基准转换

飞行管理系统内部涉及方位的所有计算,包括两点间的航线角计算,参考点/方位/距离和参考点/方位/参考点/方位的位置计算均采用真北基准。当输入或输出方位角、航线角等为磁北基准时,将进行方位角的真/磁基准转换,其流程图如图3所示。

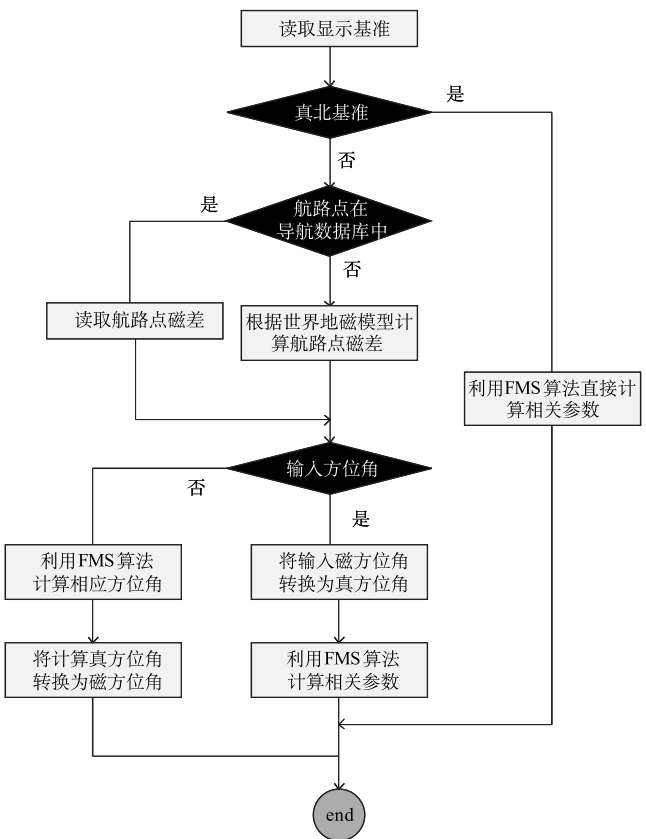


图3 飞行管理系统真/磁基准转换流程

Fig.3 True/Magnetic reference conversion process of flight management system

然而,在使用世界地磁模型进行磁差计算时缺少航路点的高度信息。通常,飞行计划中的大部分航路点都分布在巡航段,因此在使用世界地磁模型时将航路点的高度设定在巡航高度附近。民航航线飞机飞行的巡航高度一般在8000~10000m之间,考虑高度层划分在实际应用中选固定的高度8400m。

5 高度对磁差计算准确性的影响

使用世界地磁模型进行磁差计算需要提供航路点的经纬度、高度以及时间信息。然而在飞行管理系统中采取固定的航路点高度来进行磁差计算。因此需要评估高度信息对航路点磁差计算准确性的影响。

表1给出了使用世界地磁模型,航路点高度分别取地面、中空(6000m)及高空(8400m)时磁差的计算结果。其中航路点的选取参考WMM官方提供的典型航路点。

表1 不同高度下航路点磁差计算结果
Table 1 Declination angle for waypoint under different altitudes

日期	纬度/(°)	经度/(°)	磁差/(°)		
			地面	中空	高空
2015.0	80	0	-3.8489	-3.8744	-3.8846
2015.0	0	120	0.5696	0.5689	0.5685
2015.0	-80	240	69.8054	69.7699	69.7557
2016.0	80	0	-3.4112	-3.4367	-3.4469
2016.0	0	120	0.4706	0.4700	0.4698
2016.0	-80	240	69.7170	69.6816	69.6675
2017.0	80	0	-2.9716	-2.9971	-3.0072
2017.0	0	120	0.3716	0.3713	0.3712
2017.0	-80	240	69.6288	69.5936	69.5795
2018.0	80	0	-2.5303	-2.5556	-2.5657
2018.0	0	120	0.2727	0.2727	0.2727
2018.0	-80	240	69.5408	69.5057	69.4916
2019.0	80	0	-2.087	-2.1124	-2.1225
2019.0	0	120	0.1740	0.1742	0.1744
2019.0	-80	240	69.4530	69.4180	69.4040
2020.0	80	0	-1.6427	-1.6674	-1.6775
2020.0	0	120	0.0753	0.0759	0.0761
2020.0	-80	240	69.3653	69.3305	69.3165

从表1可以看出,当航路点在地面、中空和高空时,使用世界地磁模型计算的磁差相差不大。根据计算出的磁差,可以得到在地面和中空(6000m)时其磁差的RMS为0.025;在地面和高空(8400m)时RMS为0.035。而军用规范MIL-W-89500对磁差的精度要求为 1° 。由此可知,世界地磁模型中的高度信息在飞机飞行高度内对各航路点的磁

差影响可以忽略。

6 结束语

本文通过引入世界地磁模型来支持飞行管理系统方位角的真/磁基准转换功能,同时也评估了飞行高度对磁差计算结果的影响。结果表明,磁差计算精度满足 MIL-W-89500 规范要求,飞行高度对磁差的影响可以忽略,世界地磁模型可以应用于飞行管理系统。采用世界地磁模型计算磁场参数也可为其他机载系统/设备提供参考。

AST

参考文献

- [1] 李忠亮,边少锋,李忠美.基于 WMM2010 地磁模型的微卫星姿态确定[J].海洋测绘,2012,32(5):1-13.
LI Zhongliang, BIAN Shaofeng, LI Zhongmei. Micro-satellite attitude determination based on WMM2010[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012,32(5):11-13.(in Chinese)

- [2] 孙渊,张金生,王仕成,等.基于主磁场长期变化模型的地磁导航基准图时变修正[J].中国惯性技术学报,2011,19(5):543-548.

SUN Yuan, ZHANG Jingsheng, WANG Shicheng, et al. Time-variation update for geomagnetic navigation reference map based on secular variation model of main geomagnetic field[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(5): 543-548. (in Chinese)

- [3] Chulliat A, Macmillan S, Alken P, et al. The US/UK world magnetic model for 2015-2020[R]. Technical Report, National Geophysical Data Center, NOAA. 2015.

作者简介

田佩(1986—)女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机设计。
Tel: 029-86832928

E-mail: wenyutp@hotmail.com

朱斌(1978—)男,高级工程师。主要研究方向:飞机设计。

Application of World Magnetic Model in Flight Management System

TIAN Pei*, ZHU Bin

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an, 710089 China

Abstract: True north is used as the basic azimuth reference in flight management system. Aiming at the problem that the pilot can select magnetic north as the azimuth input and display reference, the world magnetic model was introduced to calculate the declination angle for any geographic point in order to converse the azimuth between true north and magnetic north. The affect of altitude on calculation accuracy for declination angle was also analyzed. The test indicates the actual accuracy meets the requirement of specification MIL-W-89500. The world magnetic model can be used in flight management system.

Key Words: world magnetic model; flight management system; declination angle

Received: 2015-08-19; Revised: 2016-02-26; Accepted: 2016-04-11

*Corresponding author. Tel. : 029-86832928 E-mail: wenyutp@hotmail.com